

Report, Published Version

Schröder, Michael

Einfluss der Vorlandvegetation auf den Hochwasserabfluss und die Sohlstabilität in Bundeswasserstraßen. FuE-Abschlussbericht A39530110036

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/105090>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

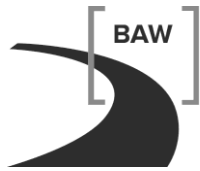
Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.) (2016): Einfluss der Vorlandvegetation auf den Hochwasserabfluss und die Sohlstabilität in Bundeswasserstraßen. FuE-Abschlussbericht A39530110036. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.

Verwertungsrechte: Alle Rechte vorbehalten

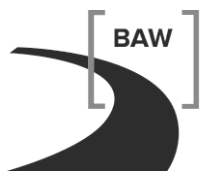


Bundesanstalt für Wasserbau
Kompetenz für die Wasserstraßen

FuE-Abschlussbericht
Einfluss der Vorlandvegetation auf den
Hochwasserabfluss und die Sohlstabilität
in Bundeswasserstraßen
A39530110036



Januar 2016



Bundesanstalt für Wasserbau
Kompetenz für die Wasserstraßen

FuE-Abschlussbericht

Einfluss der Vorlandvegetation auf den Hochwasserab- fluss und die Sohlstabilität in Bundeswasserstraßen

Beginn des Vorhabens: 2001

Auftrags-Nr.: BAW-Nr. A395.301.10036

Aufgestellt von:	Abteilung:	Wasserbau im Binnenbereich
	Referat:	W2 Flussbau
	Projektleiter	Dr.-Ing. Michael Schröder

Karlsruhe, Januar 2016

Der Bericht darf nur ungekürzt vervielfältigt werden. Die Vervielfältigung und eine Veröffentlichung bedürfen der schriftlichen Genehmigung der BAW.

Bundesanstalt für Wasserbau

Kußmaulstraße 17 • 76187 Karlsruhe
Tel.: 0721 97 26-0 • Fax: 0721 97 26-45 40

Wedeler Landstraße 157 • 22559 Hamburg
Tel.: 040 81 908-0 • Fax: 040 81 908-373

Bundesanstalt für Wasserbau

Kußmaulstraße 17 • 76187 Karlsruhe
Tel.: 0721 97 26-0 • Fax: 0721 97 26-45 40

Wedeler Landstraße 157 • 22559 Hamburg
Tel.: 040 81 908-0 • Fax: 040 81 908-373

Zusammenfassung

In der mehrdimensionalen Modellierung von Fließgewässern wird die Modellähnlichkeit im Wesentlichen durch die Kalibrierung von Rauheitsparametern erzielt, die den Strömungswiderstand des Gewässerbettes parametrisieren. Während der Strömungswiderstand eines sandig-kiesigen Mittelwasserbetts verhältnismäßig stringent aus der Sieblinie ermittelt werden kann, sind die Verhältnisse im Fall von über- und durchströmter Vegetation, die man außerhalb des Mittelwasserbettes im Bereich der Vorländer antrifft, wesentlich komplexer. Dies wird besonders deutlich an speziellen Eigenschaften von Pflanzen, wie Flexibilität unter Strömungsbelastung oder jahreszeitliche Veränderung der Belaubung. Darüber hinaus müssen für den Fall durchströmter Vegetation grundsätzlich andere Gleichungen als für den Fall überströmter Vegetation verwendet werden, da der Strömungswiderstand im ersten Fall mit steigendem Abfluss zunimmt, während er im zweiten Fall abnimmt.

In der Planung und Durchführung von Unterhaltungs- und Ausbaumaßnahmen an den frei fließenden und staugeregelten Bundeswasserstraßen sowie bei der Bewertung von Bau- maßnahmen Dritter sind auch immer Hochwasserabflüsse zu betrachten, bei denen häufig dicht bewaldete Vorlandflächen das Abflussgeschehen dominieren. Die möglichst genaue rechnerische Berücksichtigung des Strömungswiderstands der Vegetation über ein weites Spektrum von Abflusszuständen ist bedeutend für die Ermittlung von Wasserständen und Fließgeschwindigkeiten und folglich für die Abschätzung von morphodynamischen Prozessen (Geschiebetransport, Sohlstabilität und Fehlstellenentwicklung).

Dieser Abschlussbericht gibt eine kurze Übersicht über die im Rahmen des Forschungsprojektes durchgeführten Arbeiten und verweist auf die Berichte der beauftragten Institute und betreuten wissenschaftlichen Arbeiten.

(1) Titel		FuE-Abschlussbericht Einfluss der Vorlandvegetation auf den Hochwasserabfluss und die Sohlstabilität in Bundeswasserstraßen	
(2) Ort	(3) Wasserstr.-Nr.	(4) Kilometer von bis	
(5) Projektleiter Dr.-Ing. Michael Schröder			
(6) Bearbeiter			
(7) Mitarbeiter			
(8) Auftrags-Nr.		A395.301.10036	
(9) Auftragsdatum 2001		(10) aufgestellt am 29.01.2016	
(11) Seitenzahl 40	(12) Sonderhinweise		
<p>(13) Kurzfassung</p> <p>In der mehrdimensionalen Modellierung von Fließgewässern wird die Modellähnlichkeit im Wesentlichen durch die Kalibrierung von Rauheitsparametern erzielt, die den Strömungswiderstand des Gewässerbetts parametrisieren. Während der Strömungswiderstand eines sandig-kiesigen Mittelwasserbetts verhältnismäßig stringent aus der Sieblinie ermittelt werden kann, sind die Verhältnisse im Fall von über- und durchströmter Vegetation, die man außerhalb des Mittelwasserbettes im Bereich der Vorländer antrifft, wesentlich komplexer. Dies wird besonders deutlich an speziellen Eigenschaften von Pflanzen, wie Flexibilität unter Strömungsbelastung oder jahreszeitliche Veränderung der Belaubung. Darüber hinaus müssen für den Fall durchströmter Vegetation grundsätzlich andere Gleichungen als für den Fall überströmter Vegetation verwendet werden, da der Strömungswiderstand im ersten Fall mit steigendem Abfluss zunimmt, während er im zweiten Fall abnimmt.</p> <p>In der Planung und Durchführung von Unterhaltungs- und Ausbaumaßnahmen an den frei fließenden und staugeregelten Bundeswasserstraßen sowie bei der Bewertung von Baumaßnahmen Dritter sind auch immer Hochwasserabflüsse zu betrachten, bei denen häufig dicht bewaldete Vorlandflächen das Abflussgeschehen dominieren. Die möglichst genaue rechnerische Berücksichtigung des Strömungswiderstands der Vegetation über ein weites Spektrum von Abflusszuständen ist bedeutend für die Ermittlung von Wasserständen und Fließgeschwindigkeiten und folglich für die Abschätzung von morphodynamischen Prozessen (Geschiebetransport, Sohlstabilität und Fehlstellenentwicklung).</p> <p>Dieser Abschlussbericht gibt eine kurze Übersicht über die im Rahmen des Forschungsprojektes durchgeführten Arbeiten und verweist auf die Berichte der beauftragten Institute und betreuten wissenschaftlichen Arbeiten.</p>			
(14) Standort		(15) Archiv-Nr.	

Inhaltsverzeichnis		Seite
1	Problemstellung und Ziele	1
1.1	Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens	1
1.2	Bedeutung für die WSV	1
1.3	Untersuchungsziele	3
2	Untersuchungsmethoden	3
3	Ergebnisse	4
3.1	Durchgeführte Arbeiten, Labor- und Naturuntersuchungen	4
3.1.1	Laborversuche der Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft	4
3.1.2	Naturuntersuchungen am Niederrhein	5
3.1.3	Forschungsprojekt der BfG zur Erfassung von Vorlandvegetation	6
3.1.4	Betreute Abschlussarbeiten	7
3.2	Analytische und numerische Berechnungsansätze	7
3.2.1	Klassifizierung des Vorlandbewuchses	8
3.2.2	Überströmter Bewuchs als Oberflächenrauheit	8
3.2.3	Überströmter Bewuchs als Formwiderstand	9
3.2.4	Starrer durchströmter Bewuchs	20
3.2.5	Flexibler durchströmter Bewuchs	24
4	Ausblick	25
5	Literatur	26

Bildverzeichnis

Seite

Bild 3-1: Versuchsrinne für überströmten Bewuchs im Labor der Versuchsanstalt für Wasserbau der Fachhochschule Karlsruhe	4
Bild 3-2: Messstellen Langel, Perrich und Emmerich	5
Bild 3-3: Überströmter Bewuchs als Formwiderstand nach Huthoff (2007)	10
Bild 3-4: Kräfteansatz am umströmten Zylinder	11
Bild 3-5: Fließgeschwindigkeitsprofil in überströmter Vegetation nach Huthoff (2007)	15
Bild 3-6: Fließwiderstand überströmter Vegetation	16
Bild 3-7: Geschwindigkeitsprofil bei überströmter Vegetation (nach van Velzen, 2003)	17
Bild 3-8: Mehrschichtenansatz für überströmte Vegetation	19
Bild 3-9: Fließtiefenverhältnis h_r	23
Bild 3-10: Exemplarischer Fließwiderstand von durchströmtem Bewuchs (Parameter: $d_p = 0,2\text{m}$ und $a_p = 4,0\text{m}$)	24

Tabellenverzeichnis

Seite

Tabelle 3-1: Strömungsmessungen am Niederrhein	6
Tabelle 3-2: Vegetationsmessungen am Niederrhein	6
Tabelle 3-3: Turbulentes Längenmaß bei der Zylinderumströmung	12

1 Problemstellung und Ziele

1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

In der mehrdimensionalen Modellierung von Fließgewässern wird die Modellähnlichkeit im Wesentlichen durch die Kalibrierung von Rauheitsparametern erzielt, die den Strömungswiderstand des Gewässerbetts parametrisieren. Während der Strömungswiderstand eines sandig-kiesigen Mittelwasserbetts verhältnismäßig stringent aus der Sieblinie ermittelt werden kann, sind die Verhältnisse im Fall von über- und durchströmter Vegetation, die man außerhalb des Mittelwasserbettes im Bereich der Vorländer antrifft, wesentlich komplexer. Dies wird besonders deutlich an speziellen Eigenschaften von Pflanzen, wie Flexibilität unter Strömungsbelastung oder jahreszeitliche Veränderung der Belaubung. Darüber hinaus müssen für den Fall durchströmter Vegetation grundsätzlich andere Gleichungen als für den Fall überströmter Vegetation verwendet werden, da der Strömungswiderstand im ersten Fall mit steigendem Abfluss zunimmt, während er im zweiten Fall abnimmt.

In den 80er-Jahren des 20. Jahrhunderts wurden im Rahmen eines DFG-Schwerpunktprogramms umfangreiche Forschungen initiiert, die sich mit dem Strömungswiderstand von durchströmter Vegetation befassten. Die Ergebnisse der Forschung mündeten in dem DVWK-Merkblatt 220 („Hydraulische Berechnung von Fließgewässern“, 1991). Mit dem Abschluss des DFG-Schwerpunktprogramms wurden aufgrund der bereits angesprochenen Komplexität des Themas bei Weitem nicht alle Forschungsziele erreicht, so dass sich bis heute zahlreiche Forschungsarbeiten mit dem Strömungswiderstand von Pflanzen beschäftigen. Hierbei stehen häufig Teilaspekte im Vordergrund, wie Flexibilität von Pflanzen oder neue Berechnungsansätze für über- und durchströmten Bewuchs, während sich andere Arbeiten mit der Katalogisierung von Vegetationsformen und deren Fließwiderstandsverhalten sowie mit der Erfassung von Bewuchsformen mithilfe der Fernerkundung beschäftigen.

1.2 Bedeutung für die WSV

In der Planung und Durchführung von Unterhaltungs- und Ausbaumaßnahmen an den frei fließenden und staugeregelten Bundeswasserstraßen sowie bei der Bewertung von Bau- maßnahmen Dritter sind auch immer Hochwasserabflüsse zu betrachten, bei denen häufig dicht bewaldete Vorlandflächen das Abflussgeschehen dominieren. Die möglichst genaue

rechnerische Berücksichtigung des Strömungswiderstands der Vegetation über ein weites Spektrum von Abflusszuständen ist bedeutend für die Ermittlung von Wasserständen und Fließgeschwindigkeiten und folglich für die Abschätzung von morphodynamischen Prozessen (Geschiebetransport, Sohlstabilität und Fehlstellenentwicklung). Insbesondere in den folgenden drei Situationen ist die Verwendung von physikalisch-wissenschaftlich fundierten Berechnungsansätzen zur Ermittlung des Strömungswiderstands von Pflanzen zwingend erforderlich:

- Die Kalibrierung eines Strömungsmodells erfordert für den Lastfall Hochwasserabfluss auch entsprechende Naturmessdaten. Im Bereich von extremen Hochwasserabflüssen sind allerdings Naturmessdaten nur spärlich oder überhaupt nicht verfügbar, so dass häufig mit dem bei niedrigeren Abflüssen kalibrierten Strömungsmodell eine Extrapolation auf extreme Hochwasserstände erfolgen muss.
- Bei der instationären Strömungsmodellierung einer Hochwasserganglinie variiert der Strömungswiderstand von durch- und überströmter Vegetation in einem sehr weiten Bereich und kann mit konstanten Beiwerten der einfachen Fließgesetze nach Manning-Strickler, Nikuradse usw. nicht mehr beschrieben werden. Die korrekte Modellierung der Abflussverteilung zwischen Fluss und Vorland hat erhebliche Auswirkungen auf die Schleppkräfte des Gewässers. Fundierte Ansätze für den Vegetationswiderstand sind daher von essentieller Bedeutung für jede morphodynamische Langzeitstudie.
- Die planerischen Maßnahmen Dritter und vermutlich auch die künftigen wasserwirtschaftlichen Aufgaben der WSV („Blaues Band“) betreffen häufig eine verbesserte ökologische Vernetzung der Vorlandauen und deren Anbindung an das Fließgewässer. Diese Maßnahmen sind hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Belange der Schifffahrt und den Hochwasserschutz zu planen bzw. zu bewerten. Solche Maßnahmen führen häufig zu einer Veränderung des Hochwasserquerschnitts durch die Rückverlegung von Deichen oder Anbindung von nicht durchströmten Altarmen bzw. Anpflanzung oder Tolerierung einer auetypischen Vegetation. Eine Kalibrierung von Rauheitsparametern zur Beschreibung des Strömungswiderstands von Vegetation ist bei derartigen planerischen Maßnahmen vom Grundsatz her nicht möglich.

1.3 Untersuchungsziele

Das Forschungs- und Entwicklungsvorhaben „Vorlandvegetation“ verfolgt die Ziele:

- Methoden zur Erfassung, Beschreibung und Parametrisierung der Vegetation zusammenzustellen und hinsichtlich der praktischen Eignung für den Bereich der Bundeswasserstraßen zu bewerten und zu erproben,
- Berechnungsverfahren gemäß dem aktuellen Stand der internationalen Forschung bereitzustellen und ggf. weiterzuentwickeln, die im Rahmen der mehrdimensionalen mathematisch-numerischen Modellierung zur Berücksichtigung des Widerstandsverhaltens durch- und überströmter Vorlandvegetation geeignet sind und
- typische Vegetationsformen im Vorlandbereich der Fließgewässer zu katalogisieren.

2 Untersuchungsmethoden

Aufgrund der zahlreichen Forschungsarbeiten auf dem Gebiet des Strömungswiderstands von Vegetation wurden die verfügbaren Forschungsergebnisse in einem ersten Schritt und dann weiterhin kontinuierlich aus der einschlägigen Literatur entnommen. Auf der Grundlage dieser Literaturanalyse erfolgte im zweiten Schritt die Identifikation des heutigen Forschungsbedarfs. Hierbei stand die anwendungsorientierte Forschung im Vordergrund, deren Ergebnisse möglichst unmittelbar zur Qualifizierung der in der BAW eingesetzten mehrdimensionalen Berechnungsverfahren verwendet wurde. Eher grundlagenorientierte Forschungsarbeiten wurden gefördert, beispielsweise durch die Kooperation mit Forschungsinstituten der Universitäten und Hochschulen. Durch eigene Aufträge an Forschungseinrichtungen wurde die Durchführung von Modellversuchen in Wasserbaulaboratorien und von Naturversuchen im Bereich der Bundeswasserstraßen vergeben. Mit diesen Forschungsergebnissen hat die BAW eine Datengrundlage erhalten, die unmittelbar zur weiteren Qualifizierung der eigenen Modellverfahren eingesetzt werden kann.

3 Ergebnisse

3.1 Durchgeführte Arbeiten, Labor- und Naturuntersuchungen

3.1.1 Laborversuche der Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft

Zu Beginn der Laufzeit des Forschungsprojektes wurde die Versuchsanstalt für Wasserbau der Fachhochschule Karlsruhe (heute: Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft) in den Jahren 2003 bis 2004 mit der Durchführung von Laboruntersuchungen beauftragt. Die Ergebnisse der Untersuchungen wurden in zwei umfassenden Berichten zusammengestellt (Eisenhauer, Sommer, 2003; Eisenhauer, Sommer, 2004).



Bild 3-1: Versuchsrinne für überströmten Bewuchs im Labor der Versuchsanstalt für Wasserbau der Fachhochschule Karlsruhe

Die Laboruntersuchungen hatten unter anderem zum Ziel, die verfügbaren Berechnungsansätze von Lindner (1982) und Pasche (1984), die die Grundlage des DVWK-Merkblatts 220 (DVWK, 1991) bilden sowie die neueren Ansätze von van Velzen et al. (2003) für überströmten Bewuchs hinsichtlich ihrer Eignung für die Strömungsberechnung an Bundeswasserstraßen zu validieren (Bild 3-1).

3.1.2 Naturuntersuchungen am Niederrhein

In den Jahren 2007 bis 2013 wurden Naturmessungen am Niederrhein durchgeführt. Hierzu wurde im Rahmen einer Forschungskooperation mit dem Lehrstuhl und Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der RWTH Aachen, dem Ingenieurbüro valitec simulations aus Aachen und mit Unterstützung des Wasser- und Schifffahrtsamtes Duisburg–Rhein ein Messkonzept für ausgewählte Bereiche am Niederrhein aufgestellt. Die Bereiche Langel, Perrich und Emmerich (vgl. Bild 3-2) wurden unter dem Aspekt einer regelmäßigen Über- und Durchströmung der Vorlandvegetation ausgewählt, so dass innerhalb der Vertragslaufzeit einige Hochwasserereignisse erfasst werden konnten.

Nr.	Messstelle	Rhein-km	Länge [km]	Breite [km]	Lage
1	Langel	670,0 – 672,5	2,5	0,5	Kurveninnenseite, rechts
2	Perrich	616,0 – 617,5	1,5	1,5	Kurveninnenseite, links
3	Emmerich	835,5 – 856,0	2,5	1,0	Kurvenaußenseite, rechts



Bild 3-2: Messstellen Langel, Perrich und Emmerich

Eine Zusammenstellung der durchgeführten Strömungsmessungen ist mit Tabelle 3-1 gegeben. An zwei Standorten wurden außerdem Vegetationsmessungen durchgeführt (Tabelle 3-2). Auf eine gesonderte Vegetationserfassung konnte in Emmerich verzichtet werden, da hier

im Rahmen einer Kooperation mit dem NABU (BAW, 2014) die Ergebnisse einer Biotopkartierung vorlagen. Eine kurze Dokumentation des IWW zu den durchgeführten Untersuchungen ist in einem Bericht zusammengestellt (IWW, Valitec, 2015).

Nr.	Datum	Uhrzeit [MEZ]	Messstelle [-]	Mittlerer Abfluss [m³/s]	Mittlerer Wsp. [mNN]	Mittlere Fließ- tiefe Vorland [m]
1	5.03.2007	17:04 – 17:56	Perrich	6200	-	-
2	6.03.2007	9:57 – 16:29	Perrich	6195	19,05	2,70
3	14.08.2007	14:06 – 17:49	Perrich	4665	17,71	1,45
4	1.03.2010	12:32 – 16:17	Langel	5327	45,29	2,99
5	2.03.2010	11:20 – 15:58	Langel	5198	45,11	2,81
6	3.03.2010	12:13 – 16:29	Perrich	5350	18,38	2,12
7	11.12.2010	11:11 – 15:42	Langel	5747	45,67	3,37
8	12.12.2010	11:09 – 15:30	Langel	6016	45,83	3,53
9	12.01.2011	12:31 – 15:04	Perrich	8230	20,36	4,10
10	21.12.2001	12:30 – 16:18	Emmerich	5064	14,22	2,14
11	28.12.2012	11:17 – 16:16	Emmerich	6335	15,24	3,16
12	7.06.2013	10:36 – 15:18	Emmerich	5863	14,89	2,81

Tabelle 3-1: Strömungsmessungen am Niederrhein

Nr.	Datum	Messstelle [-]	Feldtage [Anzahl]	Aufnahmepunkte [Anzahl]
1	27.02. bis 29.02.2008	Perrich	6200	914
2	15.04. bis 5.05.2010	Langel	3	1579

Tabelle 3-2: Vegetationsmessungen am Niederrhein

3.1.3 Forschungsprojekt der BfG zur Erfassung von Vorlandvegetation

Das BfG-Forschungsprojekt der BfG wurde in der Zeit vom 1.01.2012 bis 31.12.2014 von zwei Instituten des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT), dem Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung (IPF) sowie dem Institut für Wasser und Gewässerentwicklung (IWG), bearbeitet. Die BAW war während der gesamten Projektlaufzeit beratend eingebunden.

Ziel des BfG-Projektes war die Entwicklung von Methoden zur automatisierten Ableitung von Flussvorlandrauheiten für große Modellgebiete. Hierzu wurde am IPF ein Klassifikator entwickelt, der anhand von Daten aus einem Projektgebiet 2 (Perrich, Bislicher Insel am Niederrhein, km 815,0 – 824,0) trainiert und anschließend auf zwei weitere Projektgebiete (Langel, Rhein-km 669,0 – 673,5 und Mäanderstrecke Köln – Düsseldorf, Rhein-km 715,5 – 735,0) angewendet wurde. Es zeigte sich zwar, dass die Qualität der klassifizierten Gebiete nicht die verfügbaren manuellen Kartierungen der gleichen Gebiete erreichte, da die Auswertung ausschließlich auf flugzeuggestützten Laserscanner-Daten mit Full-Waveform-Informationen (ALS-Daten) beruhte. Eine Verbesserung der Klassifizierungsergebnisse wird die Hinzunahme weiterer Daten, wie zum Beispiel RGB-Luftbildinformationen, erfordern.

3.1.4 Betreute Abschlussarbeiten

In der Laufzeit des Projektes wurden eine Diplomarbeit (Hänßig, 2008) und eine Bachelorarbeit (Servouse, 2015) betreut.

Im Rahmen der Diplomarbeit von Hänßig erfolgte auch die Bewuchskartierung in Perrich in der Zeit vom 27.02. bis 29.02.2008 sowie die weitergehende Auswertung dieser Daten. Im Rahmen einer 2D-tiefengemittelten Strömungsmodellierung zeigte der Diplomand die generelle Eignung der implementierten Berechnungsansätze für durchströmten Bewuchs im Vergleich zu den in diesem Flussabschnitt ebenfalls verfügbaren ADCP-Strömungsmessungen.

Im Rahmen der Bachelorarbeit wurden von Servouse die neueren Ansätze für durchströmten und flexiblen Bewuchs eingesetzt, um im Rahmen einer 2D-tiefengemittelten Strömungsmodellierung die Auswirkungen von technisch-biologischen Ufersicherungen im Bereich der Versuchsstrecke Worms am Oberrhein auf den Hochwasserabfluss zu quantifizieren.

3.2 Analytische und numerische Berechnungsansätze

Durch die Mitarbeit in der DWA Arbeitsgruppe WW-3.1 „*Hydraulische Berechnung von Fließgewässern mit Vegetation*“ konnten die zunächst prototypisch im Modellverfahren Rismo2D implementierten Berechnungsansätze insbesondere in den letzten Jahren an den aktuellen Stand der Forschung angepasst und darüber hinaus weiterentwickelt werden. Das geplante DWA-Merkblatt befindet sich derzeit noch in der Bearbeitung. Die Herausgabe des Gelbdrucks ist für Herbst 2016 vorgesehen. An dieser Stelle werden im Wesentlichen die in Kapitel 5 des Merkblatts zusammengestellten Berechnungsansätze für durch- und überströmte

Vegetation dargestellt. Für die in einer C++-Bibliothek implementierten Berechnungsansätze zur Berechnung des Vegetationswiderstands ist eine HTML-Dokumentation verfügbar.

3.2.1 Klassifizierung des Vorlandbewuchses

Entgegen der früheren Systematik des DVWK-Merkblattes 220 (DVWK, 1991) erfolgt eine Einteilung des Bewuchses in Abhängigkeit von der Fließtiefe nach überströmter und durchströmter Vegetation bzw. in Abhängigkeit von der Vegetationsart nach starrer und flexibler Vegetation. Anhand dieser Klassifizierung sind die im Folgenden dargestellten Berechnungsansätze auszuwählen.

3.2.2 Überströmter Bewuchs als Oberflächenrauheit

In der hydrodynamisch-numerischen Strömungsmodellierung kann das Fließwiderstandsverhalten von überströmtem Bewuchs vereinfachend als Oberflächenrauheit betrachtet werden, sofern das Verhältnis von Fließtiefe h zu Bewuchshöhe h_p sehr groß ist. Die Gültigkeit der logarithmischen Fließgesetze ist nur bei einer Mindestüberdeckung der Rauheitserhebungen gewährleistet, die etwa bei folgendem Verhältnis liegt:

$$h/h_p > 5 \text{ bis } 10 \quad 3-1$$

Diese Forderung nach einer relativen Überdeckung lässt sich in der (instationären) numerischen Simulation natürlicher Fließgewässer im Bereich von Wasserwechselzonen nicht strikt einhalten, da hier die Fließtiefe gegen Null abfällt. Alternative Ansätze – sofern verfügbar – sind in diesen Fällen kaum praktikabel, so dass in den meisten Berechnungsverfahren der Fließwiderstand weiterhin mit den logarithmischen Widerstandsgesetzen ermittelt wird. Aufgrund der geringen Fließgeschwindigkeiten in der Wasserwechselzone ist der hierdurch verursachte Fehler allerdings auch meist vernachlässigbar.

Grundsätzlich können die verschiedenen aus der Gerinnehydraulik bekannten Fließgesetze auch für überströmten Bewuchs verwendet werden. Die Berechnung ist also grundsätzlich mit irgendeinem der aus der Gerinnehydraulik bekannten Ansätze von de Chezy, Gauckler-Manning-Strickler oder Darcy-Weisbach möglich. Der Zusammenhang zwischen den entsprechenden empirischen Beiwerten de Chezy C , Strickler k_{st} , Manning n und Darcy-Weisbach λ ist in der folgenden Gleichung dargestellt:

$$c_F = \frac{\lambda}{8} = \frac{g}{C^2} = \frac{g \cdot n^2}{r_{hy}^{1/3}} = \frac{g}{k_{St}^2 \cdot r_{hy}^{1/3}} \quad 3-2$$

Der Widerstandsbeiwert c_F beschreibt allgemein den Zusammenhang zwischen der Strömungsgeschwindigkeit u und der Schubspannungsgeschwindigkeit u_τ :

$$\tau = \rho \cdot u_\tau^2 = \rho \cdot c_F \cdot \sqrt{u_x^2 + u_y^2} \quad 3-3$$

Für die empirischen Parameter gibt es in der einschlägigen Literatur zu Gerinneströmungen umfangreiche Tabellenwerke; eine genaue Festlegung des empirischen Wertes sollte aber im Rahmen einer Modellkalibrierung mithilfe von Naturdaten erfolgen.

Eine häufig im hydraulisch rauen Bereich verwendete Formel zur Berechnung des Fließwiderstands geht auf Nikuradse zurück und berücksichtigt mit der von-Kármán-Konstanten $\kappa = 0,4$ die Fließtiefe h und die äquivalente Sandrauheit k_S .

$$c_F = \frac{\kappa^2}{\left\{ \ln \left(\frac{12 \cdot h + k_S}{k_S} \right) \right\}^2} \quad 3-4$$

Alternativ kann der Fließwiderstand auch mit dem aus der Rohrhydraulik stammenden Widerstandsgesetz von Colebrook-White berechnet werden, mit dem auch der Übergang zu hydraulisch glatten Verhältnissen berücksichtigt wird.

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2,03 \cdot \lg \left(\frac{2,51}{Re \cdot \sqrt{\lambda}} + \frac{k_S}{14,84 \cdot r_{hy}} \right) \quad 3-5$$

3.2.3 Überströmter Bewuchs als Formwiderstand

Bei hohen Abflüssen und entsprechend großen Fließtiefen im bewachsenen Vorland- und Böschungsbereich wird der überwiegende Anteil der Vegetation vollständig überströmt, und es lassen sich zwei Strömungsschichten charakterisieren: eine vegetationsfreie Oberflächenschicht $h_p < z \leq h$ und eine Widerstandsschicht $0 < z \leq h_p$ in der sich die Vegetation befindet (Bild 3-3). Ein allgemeines Konzept, den (tiefengemittelten) Gesamtwiderstand für diese Strömungskonfiguration zu ermitteln, beruht auf der Berechnung des Strömungsprofils unter dem Ansatz von vereinfachten Annahmen. Die Integration dieses Strömungsprofils zu einem spezifischen Abfluss q bzw. einer tiefengemittelten Fließgeschwindigkeit $U = q/h$ gestattet es dann, den Gesamtwiderstand der überströmten Vegetation zu bestimmen:

$$\lambda_p = \frac{8 \cdot g \cdot h \cdot I_E}{U^2}$$

3-6

Fließgeschwindigkeitsprofil bei überströmter Vegetation

Eine Möglichkeit zur Approximation des Geschwindigkeitsprofils beschreibt Huthoff (2007) in seiner Dissertation, der auf dem Ansatz von Klopstra (1997) aufbaut. Dieser Berechnungsansatz von Huthoff wird im Folgenden umfassender beschrieben.

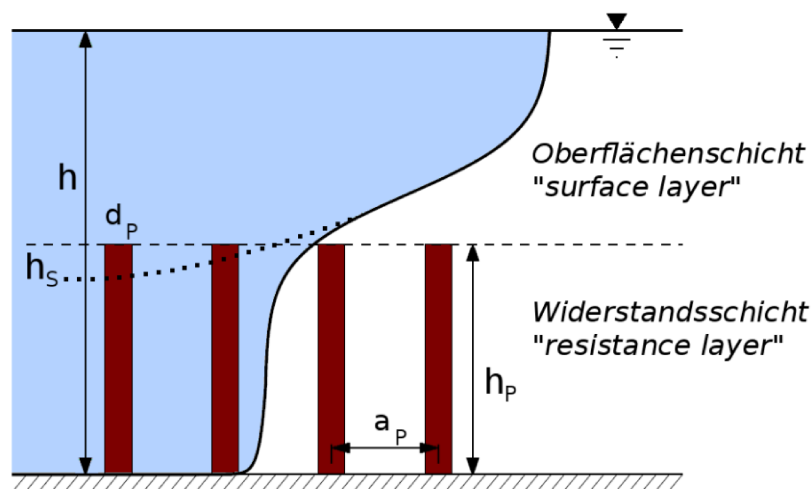


Bild 3-3: Überströmter Bewuchs als Formwiderstand nach Huthoff (2007)

Unter der Annahme stationär-gleichförmiger Strömungsbedingungen lässt sich für eine Schicht mit der differentiellen Dicke dz für den Bereich der Widerstandsschicht das Kräftegleichgewicht zwischen den turbulenten Schubspannungen, der Schwerkraft und dem Fließwiderstand der umströmten Vegetation ermitteln (Bild 3-4), die hier (zunächst) durch eine Gruppe starrer Zylinder repräsentiert wird:

$$\frac{d\tau_{uw}}{dz} = F_D - F_g$$

3-7

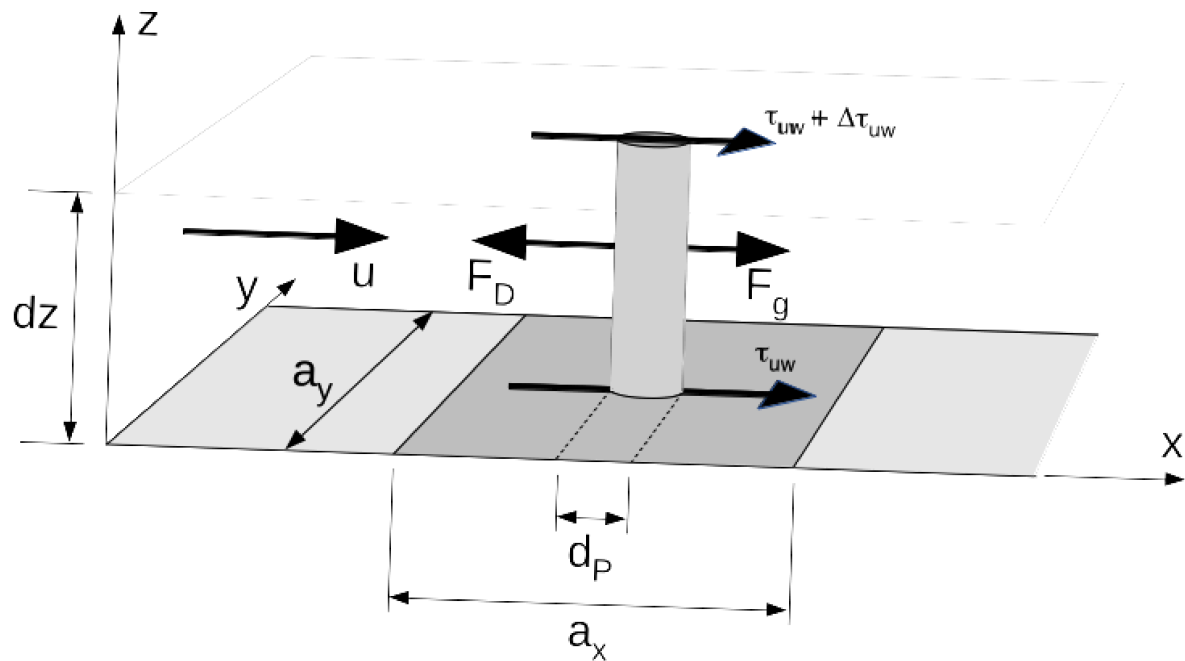


Bild 3-4: Kräfteansatz am umströmten Zylinder

Klopstra (1997) verwendet das Wirbelviskositätsmodell, um die turbulenten Schubspannungen zu modellieren, wobei die Wirbelviskosität ν_t mit der Prandtl-Kolmogorov-Beziehung vereinfachend als Produkt aus turbulentem Längenmaß und turbulentem Geschwindigkeitsmaß berechnet wird. Als turbulentes Geschwindigkeitsmaß verwendet er die Anströmgeschwindigkeit u :

$$\tau_{uw} = \rho \cdot \nu_t \cdot \frac{du}{dz} = \rho \cdot \alpha \cdot u \cdot \frac{du}{dz} \quad 3-8$$

Für das turbulente Längenmaß a werden von Klopstra (1997), van Velzen et al. (2003) und Huthoff (2007) verschiedene Näherungsformeln angegeben, die in der folgenden Tabelle zusammengestellt sind.

Klopstra (1997)	$\alpha = 0,0793 \cdot h_p \cdot \ln\left(\frac{h}{h_p}\right) - 0,0009 \quad \text{und} \quad \alpha \geq 0,001$	3-9
Van Velzen (2003)	$\alpha = 0,0227 \cdot h_p^{0,7}$	3-10
Huthoff (2007)	$\alpha = \frac{s_p \cdot h}{2 \cdot \beta_p + (h - h_p)}; \quad s_p = \frac{1}{\sqrt{m_p}} - d_p$	3-11
	$\alpha = \frac{h_p \cdot h}{2 \cdot h_p + h}$	3-12
	$\alpha = \frac{h_p \cdot s_p}{2 \cdot \beta_p + h_p}$	3-13
	$\alpha = \frac{h_p \cdot (h - h_p)}{2 \cdot (h - h_p) + h}$	3-14

Tabelle 3-3: Turbulentes Längenmaß bei der Zylinderumströmung

Die Schwerkraft F_g und der Formwiderstand F_D sind sogenannte Volumenkräfte mit der Dimension $[N/m^3]$ und ergeben sich aus dem Gefälle des Gerinnes I_0 und dem Fließwiderstand der umströmten Zylinder:

$$F_g = \rho \cdot g \cdot I_0 \quad 3-15$$

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c_D \cdot m_p \cdot d_p \cdot u^2 \quad \text{mit: } m_p = \frac{1}{a_x \cdot a_y} \quad 3-16$$

Darin ist $g = 9,81 \, m/s^2$ die Schwerkraftbeschleunigung, c_D der Widerstandsbeiwert, ρ die Dichte von Wasser, m_p die Bestockungsdichte und d_p der Zylinderdurchmesser. Nach Division durch ρ lautet die Differentialgleichung für das Fließgeschwindigkeitsprofil:

$$\frac{d}{dz} \left(\alpha \cdot u \cdot \frac{du}{dz} \right) = \frac{1}{2} \cdot c_D \cdot m_p \cdot d_p \cdot u^2 - g \cdot I_0 \quad 3-17$$

Ein paar weitere Umformungen führen schließlich auf eine kompakte Form der Gleichung, die eine analytische Lösung erlaubt (Huthoff, 2007).

$$\frac{d^2 u^2}{dz^2} - \frac{u^2}{\ell^2} = -\frac{U_{r0}^2}{\ell^2} \quad 3-18$$

$$\text{mit: } \ell = \sqrt{\alpha \cdot \beta_p} \quad 3-19$$

$$U_{r0} = \sqrt{2 \cdot g \cdot I_0 \cdot \beta_P} \quad 3-20$$

$$\beta_P = \frac{1}{c_D \cdot m_P \cdot d_P} \quad 3-21$$

Der Formwiderstandsbeiwert c_D in Gleichung 3-21 kann für starren Bewuchs mit dem Ansatz von Lindner und Pasche (in DVWK, 1991) oder für flexiblen Bewuchs mit dem Ansatz von Jalonon und Järvelä (2014) berechnet werden.

Die Lösung der Differentialgleichung 3-18 benötigt eine Randbedingung für die Schubspannungen $\tau_P = \tau(z = h_P)$ am Übergang von der Widerstandsschicht zur freien Oberflächenschicht, die sich aus dem Kräftegleichgewicht ergibt:

$$\tau_P = \rho \cdot g \cdot I_0 \cdot (h - h_P) \quad 3-22$$

Die zweite erforderliche Randbedingung ist die Strömungsgeschwindigkeit u_0 an der Gewässersohle. Für diese Randbedingung gibt es generell drei Möglichkeiten: die Haftbedingung (*no-slip*), die Spannungsfreiheit (*free-slip*) oder eine Schubspannungsrandbedingung (*slip*). Die Untersuchungen von Huthoff zeigen, dass die eigentlich physikalisch begründete Haftbedingung zusammen mit dem Turbulenzmodell nach Gleichung 3-8 deutlich größere Abweichungen zu den Messdaten aufweist, als die Annahme eines schubspannungsfreien Randes. Daher wird im Folgenden nur die analytische Lösung der Differentialgleichung 3-18 mit einem schubspannungsfreien Rand dargestellt.

Die Strömungsgeschwindigkeit des untersten Punktes setzt Huthoff mit der Strömungsgeschwindigkeit in der Widerstandsschicht nach Gleichung 3-20 gleich:

$$u_0 = U_{r0} \quad 3-23$$

Damit ist es nun möglich die analytische Lösung der Differentialgleichung anzugeben:

$$u = U_{r0} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{h - h_P}{\ell}\right) \cdot \frac{\sinh(z/\ell)}{\cosh(h_P/\ell)}} \quad 3-24$$

In der vegetationsfreien Oberflächenschicht stehen die turbulenten Schubspannungen, wie in einer turbulenten Gerinneströmung, nur noch mit der Schwerkraft im Gleichgewicht. Für diese Strömungen wird zumindest in Wandnähe der Prandtl'sche Mischungswegansatz zur Modellierung der Wirbelviskosität angesetzt. Mit dem im Bereich der Grenzschicht ($z \leq 0,2 \cdot (h - h_P)$) gültigen Ansatz lässt sich dann ein logarithmischer Verlauf des Geschwindigkeits-

profils herleiten, der von Huthoff (2007) und Klopstra (1997) für die gesamte Fließtiefe zu Grunde gelegt wird:

$$u = u_p + \frac{u_\tau}{\kappa} \cdot \ln\left(\frac{z - h_p + h_s}{h_s}\right) \quad 3-25$$

In Gleichung 3-25 ist u_p die Fließgeschwindigkeit an der Schichtgrenze zwischen Widerstands- und Oberflächenschicht, die mit Gleichung 3-24 ermittelt werden kann:

$$u_p = U_{r0} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{h - h_p}{\ell}\right) \cdot \tanh(h_p/\ell)} \quad 3-26$$

Die Rauheitshöhe h_s , die den Nullpunkt des logarithmischen Geschwindigkeitsprofils charakterisiert, wird aus dem logarithmischen Geschwindigkeitsprofil 3-25 unter Verwendung des Turbulenzmodells nach Gleichung 3-8 unter der Randbedingung für die Schubspannung nach Gleichung 3-22 ermittelt:

$$h_s = \frac{\alpha}{\kappa} \cdot \frac{u_p}{U_{r0}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \beta_p}{h - h_p}} \quad 3-27$$

Die Schubspannungsgeschwindigkeit in Gleichung 3-25 ergibt sich aus dem linearen Verlauf der Schubspannung in der Oberflächenschicht gemäß Gleichung 3-22 zu:

$$u_* = \sqrt{g \cdot I_0 \cdot (h - h_p)} \quad 3-28$$

Die logarithmische Gesetzmäßigkeit in Gleichung 3-25 ist nur im untersten Abschnitt der freien Oberflächenschicht gültig. Im darüber liegenden Bereich ($z > 0,2 \cdot (h - h_p)$) erzielt man mit der Wake-Funktion nach Coles (1956) eine bessere Übereinstimmung mit experimentellen Daten. Damit verändert sich die Gleichung zur Bestimmung des Fließgeschwindigkeitsprofils in der freien Oberflächenschicht zu:

$$u = u_p + \frac{u_*}{\kappa} \cdot \ln\left(\frac{z - h_p + h_s}{h_s}\right) + \frac{2 \cdot \Pi \cdot u_\tau}{\kappa} \cdot \sin^2\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{z - h_p}{h - h_p}\right) \quad 3-29$$

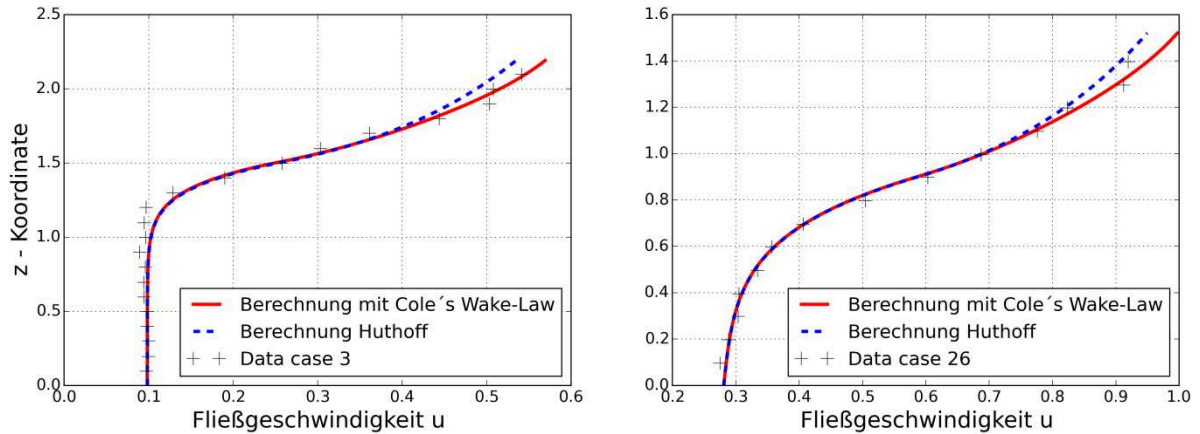


Bild 3-5: Fließgeschwindigkeitsprofil in überströmter Vegetation nach Huthoff (2007)

Fließwiderstand überströmter Vegetation

Die Integration der beiden Geschwindigkeitsprofile in den Gleichungen 3-24 und 3-25 über die Fließtiefe h ergibt für beide Schichten jeweils eine tiefengemittelte Fließgeschwindigkeit. Die analytische Integration von Gleichung 3-25 ist allerdings nur mit einer vereinfachenden Annahme möglich (Huthoff, 2007):

Tiefengemittelte Fließgeschwindigkeit in der Oberflächenschicht

$$U_S = u_p + \frac{u_*}{\kappa} \cdot \left[\frac{h - h_p + h_s}{h - h_p} \cdot \ln \left(\frac{h - h_p + h_s}{h_s} \right) - 1 \right] \quad 3-30$$

Tiefengemittelte Fließgeschwindigkeit in der Widerstandsschicht

$$U_R = U_{r0} \cdot \frac{2 \cdot \ell}{h_p} \cdot \left[\gamma_p + \frac{1}{2} \cdot \ln \left(\frac{\gamma_p - 1}{\gamma_p + 1} \right) - \gamma_0 - \frac{1}{2} \cdot \ln \left(\frac{\gamma_0 - 1}{\gamma_0 + 1} \right) \right] \quad 3-31$$

In Gleichung 3-31 sind γ_0 und γ_p die dimensionslosen Geschwindigkeiten an der Sohle ($z = 0$) bzw. an der Spitze des Bewuchses ($z = h_p$):

$$\gamma_0 = \sqrt{1 + \left(\frac{h - h_p}{\ell} \right) \cdot e^{-h_p/\ell}} \quad 3-32$$

$$\gamma_p = \sqrt{1 + \left(\frac{h - h_p}{\ell} \right)} \quad 3-33$$

Die über die gesamte Fließtiefe gemittelte Geschwindigkeit U kann nun unmittelbar berechnet werden:

$$U = \frac{h_p}{h} \cdot U_R + \frac{h - h_p}{h} \cdot U_S \quad 3-34$$

Der gesamte Fließwiderstand des überströmten Bewuchses, der z. B. in 2D-tiefengemittelten oder 1D Berechnungsverfahren anzusetzen ist, wird nun mithilfe von Gleichung 3-1 ermittelt:

$$\lambda_p = \frac{8 \cdot g \cdot h \cdot I_E}{U^2} = \frac{8 \cdot g \cdot h^3 \cdot I_E}{[h_p \cdot U_R + (h - h_p) \cdot U_S]^2} \quad 3-35$$

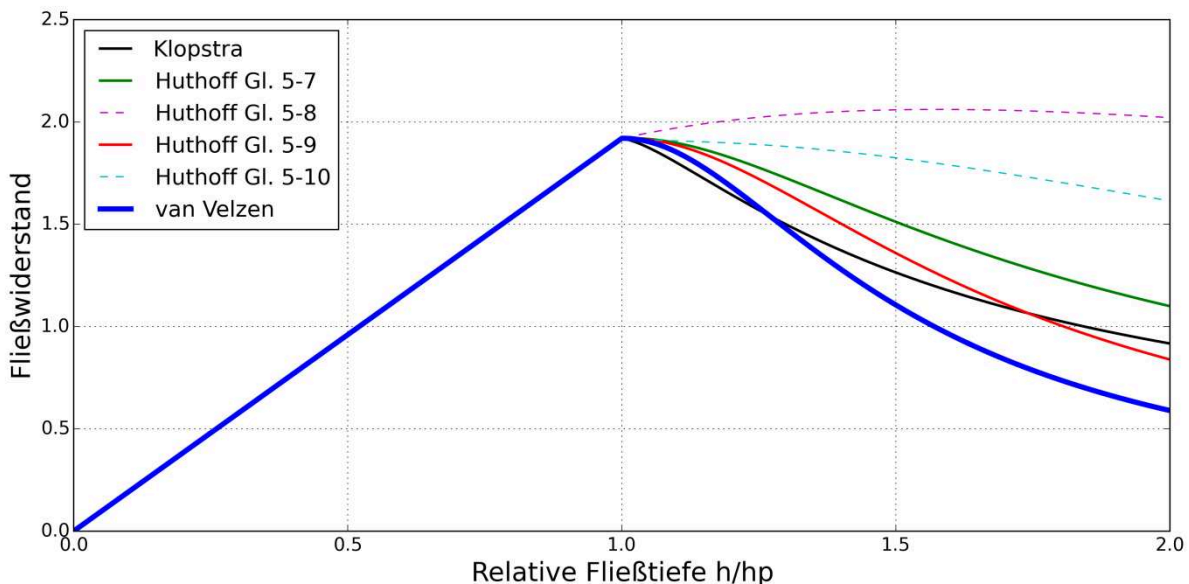


Bild 3-6: Fließwiderstand überströmter Vegetation

Einen vereinfachten Ansatz zur Berechnung des Fließwiderstands von überströmter Vegetation beschreiben van Velzen et al. (2003) in einem Report der Rijkswaterstaat. Sie unterteilen das vertikale Geschwindigkeitsprofil in 4 Bereiche (vgl. Bild 3-7), für die sie jeweils einen Teilabfluss mit unterschiedlichen Gesetzmäßigkeiten ermitteln. Die Summation der Teilabflüsse führt auf eine Gleichung, in der sich die einzelnen Fließwiderstandsgesetze überlagern. Diese Gleichung kann dann nach dem resultierenden Chezy-Beiwert aufgelöst werden.

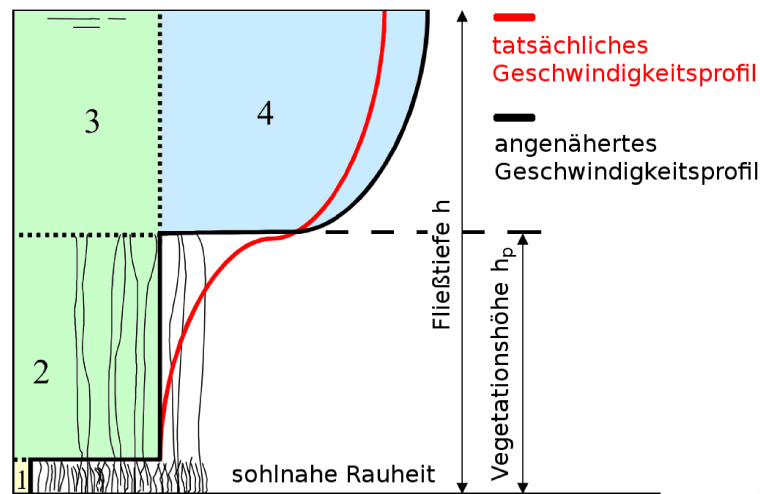


Bild 3-7: Geschwindigkeitsprofil bei überströmter Vegetation (nach van Velzen, 2003)

In Analogie zu der Vorgehensweise von van Velzen et al. soll hier eine Gleichung für Mittelbewuchs entwickelt werden, die konsistent zu den in den vorhergehenden Abschnitten beschriebenen Ansätzen zur Berechnung des Widerstandsverhaltens von Klein- und Großbewuchs ist.

Im sohlnahen Bereich 1 (Bild 3-7) wird der Fließwiderstand λ_F mit den Gleichungen von Colebrook-White (Gleichung 3-5) oder Nikuradse (Gleichung 3-4) als Oberflächenrauheit berechnet. Damit ist eine Berücksichtigung von überströmtem Bewuchs und freien unbewachsenen Oberflächen (z. B. Sand oder Kies) möglich. Der Fließwiderstand λ_F wird mit dem Vegetationswiderstand des Bereiches 2 gemäß dem Superpositionsprinzip überlagert. Für den hydraulischen Radius ist daher die Bewuchshöhe h_p einzusetzen.

In der Vegetationsschicht im Bereich 2 ergibt sich der Fließwiderstand λ_p aus den Gleichungen für den durchströmten Bewuchs nach Lindner und Pasche (in DVWK, 1991) (Gleichung 3-51 und folgende). Die Fließgeschwindigkeit im Bereich 3 ist identisch zu derjenigen im Bereich 2, so dass hier auch die gleiche Gesetzmäßigkeit gilt. Die mittlere Fließgeschwindigkeit für die Bereiche 2 und 3 ergibt sich damit zu:

$$u_2 = u_3 = \sqrt{\frac{8 \cdot g}{\lambda_F + \lambda_p} \cdot \sqrt{h_p \cdot I_0}} \quad 3-36$$

$$\text{mit:} \quad \lambda_p = \frac{4 \cdot h_p \cdot d_p}{a_x \cdot a_y} \cdot c_{DR} = 4 \cdot m_p \cdot d_p \cdot h_p \cdot c_{DR} \quad 3-37$$

$$\lambda_F = \frac{8 \cdot \kappa^2}{\left[\ln \left(\frac{12 \cdot h_p}{k_s} \right) \right]^2} \quad 3-38$$

Die mittlere Fließgeschwindigkeit in der Oberflächenschicht ist deutlich größer als in der Vegetationsschicht, sie erhöht sich nach van Velzen et al. um die Fließgeschwindigkeit u_4 die mit dem Fließgesetz nach Nikuradse (Gleichung 3-4) berechnet werden kann, wobei die Rauheitshöhe k_o aus der Bewuchshöhe ermittelt wird (Gleichung 3-41). Für die mittlere Fließgeschwindigkeit im Bereich 4 gilt somit:

$$u_4 = \sqrt{\frac{8 \cdot g}{\lambda_o}} \cdot \sqrt{(h - h_p) \cdot I_0} \quad 3-39$$

$$\text{mit:} \quad \lambda_o = \frac{8 \cdot \kappa^2}{\left[\ln \left(\frac{12 \cdot (h - h_p)}{k_o} \right) \right]^2} \quad 3-40$$

$$k_o = 1,6 \cdot h_p^{0,7} \quad 3-41$$

Der spezifische Abfluss durch die Bereiche 2, 3 und 4 wird nun zum spezifischen Gesamtabfluss q aufaddiert, wobei die Bereiche 2 und 3 zusammengefasst werden:

$$q = h_p \cdot u_2 + (h - h_p) \cdot u_3 + (h - h_p) \cdot u_4 \quad 3-42$$

Nach dem Einsetzen der Widerstandsbeziehungen nach Gleichung 3-36 und 3-39 folgt daraus der Gesamtfleißwiderstand für überströmten Mittelbewuchs:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_{tot}}} = \frac{q}{h \cdot \sqrt{8 \cdot g \cdot h \cdot I_0}} = \left(\frac{h_p}{h} \right)^{1/2} \cdot \frac{1}{\sqrt{\lambda_F + \lambda_p}} + \left(\frac{h - h_p}{h} \right)^{3/2} \cdot \frac{1}{\sqrt{\lambda_o}} \quad 3-43$$

- mit: h Fließtiefe
 h_p Bewuchshöhe
 I_E Energieliniengefälle
 κ von-Kármán-Konstante
 λ_{tot} Gesamtfleißwiderstandsbeiwert der überströmten Vegetation
 λ_F Fließwiderstandsbeiwert für überströmte Rauheiten (Bereich 1)
 λ_p Fließwiderstandsbeiwert für durchströmte Vegetation (Bereiche 2 + 3)
 k_o Rauheitshöhe an der Oberkante des überströmten Bewuchses
 λ_o Fließwiderstandsbeiwert des überströmten Bewuchses (Bereich 4)

Gleichung 3-43 ist eine konsistente Erweiterung der im folgenden Kapitel beschriebenen Berechnungsansätze von Lindner und Pasche (in DVWK, 1991). Bis zu einer Fließtiefe von $h < h_p$ wird der Fließwiderstand mit Gleichung 3-51 berechnet. Bei Fließtiefen, die größer als die Bewuchshöhe sind, erfolgt dann die Berechnung nach Gleichung 3-43.

Modellierung überströmter Vegetation mit einem Mehrschichtenansatz

Der in Kapitel 3.2.3 dargestellte Berechnungsansatz von Klopstra (1997) bzw. Huthoff (2007) unterteilt das vertikale Geschwindigkeitsprofil in eine Widerstandsschicht und eine freie Oberflächenschicht. Eine häufig im Bereich von Fließgewässern auftretende Vegetationsform sind Weidestecklinge, die sich zu großen Kopfweiden entwickeln können. Für diese Vegetationsform ist der Zwei-Schichtenansatz von Huthoff unzureichend. Im Folgenden soll daher eine Erweiterung der Berechnungsansätze von Huthoff und Klopstra dargestellt werden, die es ermöglicht den Bewuchs in vertikaler Richtung in beliebig viele Schichten zu unterteilen.

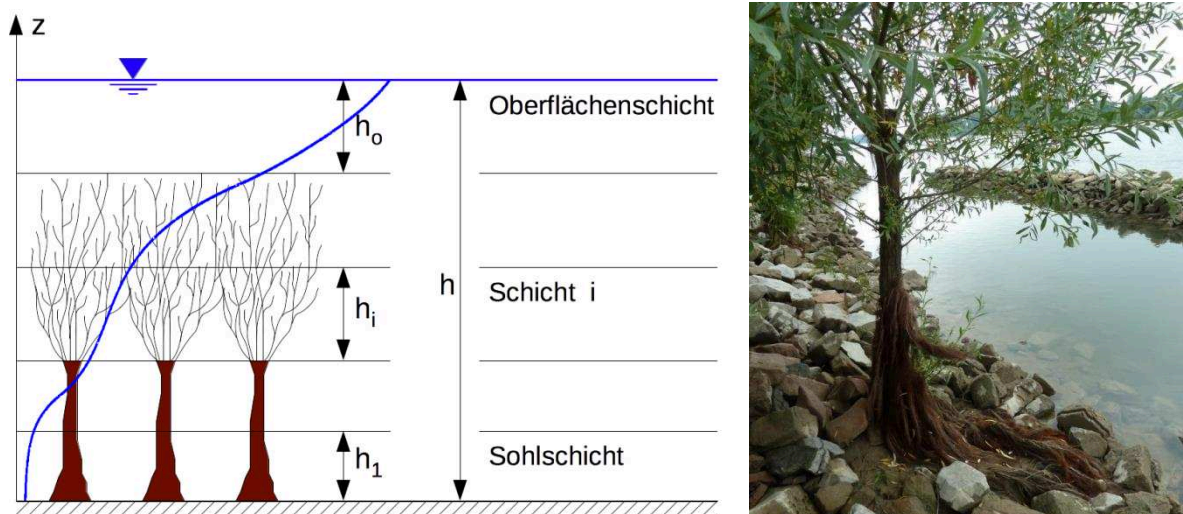


Bild 3-8: Mehrschichtenansatz für überströmte Vegetation

Die Berechnung erfolgt zweckmäßigerweise mithilfe einer numerischen Lösung der Differentialgleichung 3-18. Zu diesem Zweck kann ein einfacher Finite-Differenzenansatz verwendet werden. Die zu lösende Zentralschichtengleichung lautet für eine Schicht i der Höhe Δz :

$$\frac{r_{i-1} - 2 \cdot r_i + r_{i+1}}{\Delta z^2} - \frac{r_i}{\ell^2} = -\frac{U_{ri}}{\ell^2} \quad 3-44$$

$$\text{mit: } r_i = u_i^2 \quad 3-45$$

$$\ell = \sqrt{\alpha \cdot \beta_P} \quad 3-46$$

$$U_{ri} = \sqrt{2 \cdot g \cdot I_0 \cdot \beta_P} \quad 3-47$$

$$\beta_P = \frac{1}{c_{DR} \cdot m_P \cdot d_P} \quad c_{DR} \text{ nach Lindner und Pasche (in DVWK, 1991)} \quad 3-48$$

$$\beta_P = \frac{h_P}{c_{D,Bulk} \cdot LAI \cdot u^x} \quad c_{D,Bulk} \text{ nach Jalonen, Järvelä (2014)} \quad 3-49$$

Randbedingungen für die Differenzengleichung sind die Fließgeschwindigkeit am untersten Punkt der untersten Schicht:

$$u_0 = U_{r0} \quad 3-50$$

3.2.4 Starrer durchströmter Bewuchs

Anders als beim Fließwiderstandsverhalten von überströmtem Bewuchs, nimmt der Fließwiderstand bei durchströmtem Großbewuchs mit der Fließtiefe zu. Die in Kapitel 3.2.2 aufgeführten einfachen Fließgesetze sind aus diesem Grund völlig ungeeignet den Fließwiderstand von Großbewuchs zu bestimmen. Eine Strömungsberechnung mit dem Fließgesetz von Strickler oder Manning ist nur dann zulässig, wenn der Stricklerbeiwert in Abhängigkeit von der Fließtiefe kalibriert wird, was einen großen Aufwand für die Kalibrierung bedeuten und umfassende Naturdaten erfordern würde. Aus diesem Grund werden für Großbewuchs andere Gesetzmäßigkeiten verwendet, die die geometrische Struktur der Vegetation berücksichtigen und in den folgenden Abschnitten vorgestellt werden.

Auf der Grundlage von hydraulischen Gesetzmäßigkeiten ist es möglich, den Fließwiderstand von durchströmten, regelmäßig angeordneten und starren Bewuchsstrukturen (Bäume oder Äste) abzuschätzen. Entsprechende Widerstandsbeziehungen wurden bereits in den 1980er Jahren von Lindner (1982) und darauf aufbauend von Pasche (1984) für den Einsatz in der 1D-Strömungsmodellierung naturnaher Fließgewässer hergeleitet. Diese Ansätze wurden später in dem DVWK-Merkblatt 220 (1991) für die hydraulische Berechnung empfohlen. Da sie unmittelbar aus den Grundgleichungen der Impulserhaltung hergeleitet wurden, sind Sie für die Berechnung des Fließwiderstands von starrer und durchströmter Vegetation auch heute noch uneingeschränkt gültig.

Der Fließwiderstand λ'' von starren und durchströmten Bewuchsstrukturen ergibt sich aus der Fließtiefe h , den geometrischen Parametern der Vegetation (mittlerer Stammdurch-

messer d_P sowie mittlere Abstände in Strömungsrichtung a_x und quer dazu a_y) und einem Formwiderstandsbeiwert c_{WR} :

$$\lambda'' = \frac{4 \cdot h \cdot d_P}{a_x \cdot a_y} \cdot c_{WR} \quad 3-51$$

Der Formwiderstandsbeiwert c_{WR} charakterisiert den mittleren Fließwiderstand einer Gruppe von Zylindern und lässt sich mit der vereinfachten Methode nach Pasche aus einem Satz von Gleichungen ermitteln. Diese werden im weiteren Verlauf dieses Abschnitts eingehender erläutert.

Statt des mittleren Bewuchsabstands $a_{x,y}$ findet man insbesondere bei sehr dichtem Bewuchs auch häufig eine Angabe über die Bewuchsdichte m_P (Anzahl der Stängel oder Stöcke pro Quadratmeter). Auch auf die Unterscheidung zwischen dem Bewuchsabstand in Strömungsrichtung und quer dazu wird häufig verzichtet. Zwischen m_P und $a_{x,y}$ besteht folgender Zusammenhang:

$$m_P = \frac{1}{a_x \cdot a_y} \quad 3-52$$

Der Beiwert c_{WR} liegt in einem Bereich zwischen 0,6 und 2,4 und fasst den sich überlagernden Einfluss einer Gruppe von umströmten Zylindern und den Einfluss von Schwerewellen auf den Gesamtwiderstand zusammen. Für überschlägliche Berechnungen kann er nach Empfehlung des DVWK-Merkblattes 220 (1991) mit etwa $c_{WR} = 1,5$ abgeschätzt werden. Eine genauere Ermittlung ist mit den folgenden Gleichungen nach Lindner und Pasche (in DVWK, 1991) möglich:

$$c_{WR} = 1,31 \cdot c_{W\infty} \cdot U_r^2 + \frac{2}{Fr^2} \cdot (1 - h_r) \quad 3-53$$

Der Formbeiwert $c_{W\infty}$ eines einzelnen umströmten Kreiszylinders zeigt im Wesentlichen eine Abhängigkeit von der Reynoldszahl der Anströmung (z. B. Schlichting, 2006):

$$Re_P = \frac{U_S \cdot d_P}{\nu} \quad 3-54$$

Darin ist U_S die mittlere Anströmgeschwindigkeit, d_P der mittlere Zylinderdurchmesser und ν die kinematische Viskosität. Der Formbeiwert $c_{W\infty}$ ist das Ergebnis umfangreicher Laboruntersuchungen und kann zum Beispiel näherungsweise mit der folgenden Gleichung 3-55 berechnet werden.

$$c_{W\infty} = \begin{cases} 3,07 \cdot Re_p^{-0,168} & Re_p < 800 \\ 1,0 & 800 \leq Re_p < 6.000 \\ 1,0 + 1,2 \cdot (Re_p - 6000) & 6.000 \leq Re_p < 11.000 \\ 1,2 & 11.000 \leq Re_p < 100.000 \end{cases} \quad 3-55$$

Die relative Anströmgeschwindigkeit U_r ist das Verhältnis der Anströmungsgeschwindigkeit an einem einzelnen Zylinder zur mittleren Anströmungsgeschwindigkeit U_s und kann nach Pasche (in Rouvé, 1987) vereinfachend als Funktion der Nachlaufänge a_{NL} und der Nachlaufbreite a_{NB} aus den Gleichungen 3-56 bis 3-58 berechnet werden:

$$U_r^2 = 1,151 \cdot \left(\frac{a_{NL}}{a_x}\right)^{-0,483} + 0,5 \cdot \left(\frac{a_{NB}}{a_y}\right)^{1,1} \quad 3-56$$

$$30 = \left[\frac{a_{NL}}{c_{W\infty} \cdot d_p}\right]^{0,7} \cdot \left[1 + \frac{a_{NL}}{4,0 \cdot h} \cdot (\lambda_{so} + \lambda_p)\right]^{1,5} \quad 3-57$$

$$a_{NB} = 0,24 \cdot a_{NL}^{0,59} \cdot (c_{W\infty} \cdot d_p)^{0,41} \quad 3-58$$

Das Fließtiefenverhältnis h_r ist das Verhältnis der Fließtiefen hinter und vor dem umströmten Zylinder und ergibt sich aus der folgenden Gleichung 3. Grades, die aus einer Impulsbilanzbetrachtung an einem einzelnen Zylinder stammt (Rouvé und Schröder, 1993, BWK, 2009).

$$h_r^3 \cdot Fr^2 \cdot \left(1 - \frac{c_{W\infty}}{2} \cdot \alpha_p\right) - h_r^2 \cdot \left(Fr^2 + \frac{1 - \alpha_p}{2}\right) + \frac{1 - \alpha_p}{2} = 0 \quad 3-59$$

Darin ist das Verbauverhältnis α_p der Quotient aus mittlerem Bewuchsdurchmesser und mittlerem Bewuchsabstand:

$$\alpha_p = \frac{d_p}{a_p} \quad 3-60$$

Eine analytische Lösung der Gleichung führt auf drei mögliche Fließtiefenverhältnisse:

$$h_{r,k} = r + 2 \cdot r \cdot \cos\left[\frac{\varphi}{3} + (k-1) \cdot \frac{2 \cdot \pi}{3}\right] \quad k = 1,2,3 \quad 3-61$$

$$\text{mit: } \varphi = \arccos\left(1 - \frac{1 - \alpha_p}{4 \cdot a \cdot r^3}\right) \quad 3-62$$

$$r = \frac{b}{3 \cdot a} \quad 3-63$$

$$a = Fr^2 \cdot \left(1 - \frac{c_{W\infty}}{2} \cdot \alpha_p\right) \quad \text{und} \quad b = Fr^2 + \frac{1 - \alpha_p}{2} \quad 3-64$$

Von diesen drei mathematischen Lösungen liegt jeweils eine in einem physikalisch sinnvollen Bereich. Bei strömenden Abflussverhältnissen ($Fr < 1,0$) ist die dritte Lösung ($k = 3$), bei schießenden Abflussverhältnissen ($Fr > 1,0$) die erste Lösung ($k = 1$) physikalisch sinnvoll. Die Lösungen der Gleichung 3-61 sind in Bild 3-9 über dem Verbauverhältnis α_p dargestellt.

Die Berechnung des c_{WR} -Beiwertes mithilfe des Gleichungssystems 3-53 bis 3-64 muss iterativ erfolgen, ist daher recht aufwändig und kann bei ungeschickter Initialisierung der einzelnen Variablen divergieren. In der praktischen Anwendung ist daher generell von einer Berechnung mit einem Computerprogramm auszugehen.

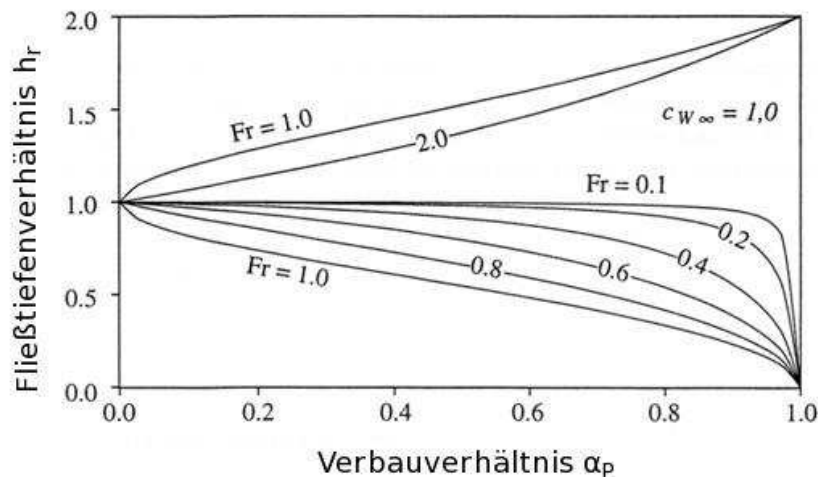


Bild 3-9: Fließtiefenverhältnis h_r

Zusätzlich zum Fließwiderstand des durchströmten Bewuchses ist auch noch der Fließwiderstand aus Sohlrauheiten zu berücksichtigen, der entweder aus überströmtem Bewuchs oder aus einem unbewachsenen Boden stammt. Dieser wird dann wie in Kap. 3.2.2 beschrieben mit der Gleichung 3-4 von Nikuradse (Gleichung 3-4) oder Colebrook-White (Gleichung 3-5) berechnet und gemäß dem Superpositionsprinzip mit dem Fließwiderstand des durchströmten Bewuchses überlagert:

$$\lambda = \lambda' + \lambda'' \quad 3-65$$

In Bild 3-10 ist der Fließwiderstand von durchströmtem Großbewuchs nach Gleichung 3-65 exemplarisch für eine Bewuchssituation dargestellt. Der Gesamtwiderstand nimmt bei sehr kleinen Fließtiefen aufgrund des dominierenden Fließwiderstands der überströmten Sohlrauheiten λ_F zunächst mit der Fließtiefe abnimmt und erreicht schließlich ein Minimum. Mit wei-

ter zunehmenden Wasserständen dominiert dann der Fließwiderstand λ_p des Bewuchses und der Gesamtwiderstand nimmt kontinuierlich zu. Hieran wird deutlich, dass eine Berechnung des Fließwiderstands von durchströmter Vegetation mit den einfachen Fließgesetzen der Gerinnehydraulik z. B. mit konstanten Strickler-Beiwerten zu physikalisch unsinnigen Ergebnissen führen kann.

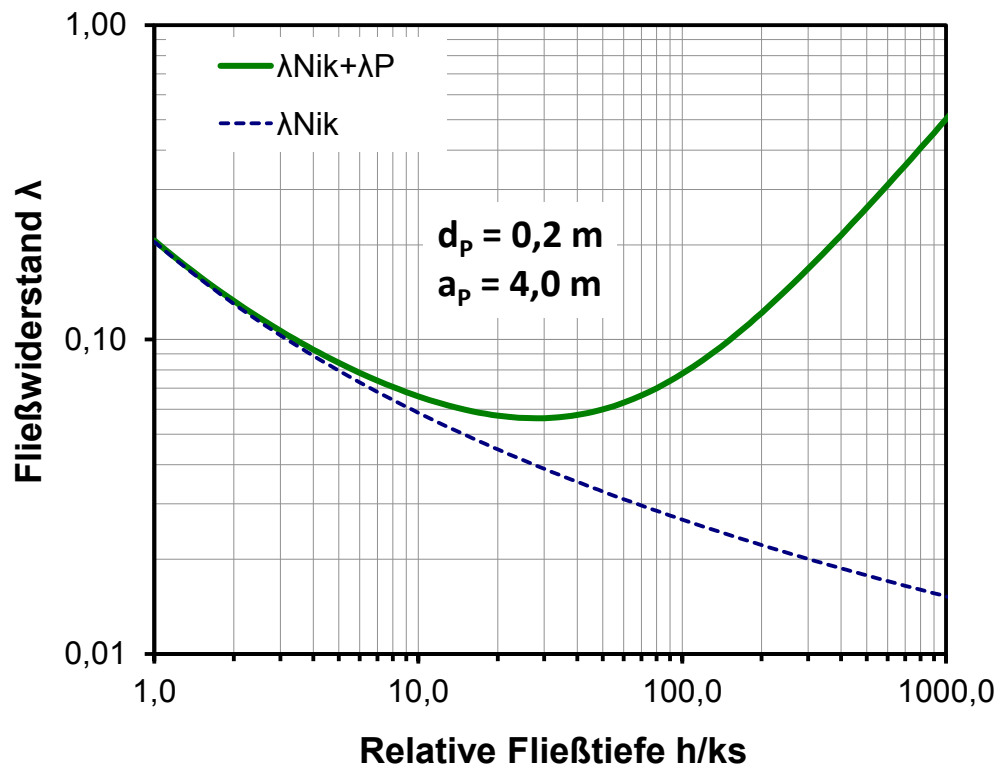


Bild 3-10: Exemplarischer Fließwiderstand von durchströmtem Bewuchs
(Parameter: $d_p = 0,2\text{m}$ und $a_p = 4,0\text{m}$)

3.2.5 Flexibler durchströmter Bewuchs

Allgemeingültigere Berechnungsansätze für flexiblen Bewuchs befinden sich derzeit in der Entwicklung. Das DWA-Merkblatt „*Hydraulische Berechnung von Fließgewässern mit Vegetation*“ der Arbeitsgruppe WW-3.1 wird voraussichtlich Ende 2016 oder Anfang 2017 erscheinen und einige Ansätze von Jalonen, Järvelä (2014) und Whitacker (2014) für flexiblen Bewuchs enthalten. Diese Ansätze wurden aus Zugversuchen mit Einzelpflanzen abgeleitet und sind daher noch nicht allgemeingültig auf beliebige Formen von flexibler Vegetation übertragbar.

4 Ausblick

In den letzten Jahren sind zahlreiche Forschungsarbeiten zum Fließwiderstandsverhalten von flexibler Vegetation entstanden. Diese Arbeiten sind aufgrund der speziellen Laborbedingungen, wie Zugversuche mit einzelnen Pflanzen, nicht allgemeingültig auf die vielfältigen äußerst heterogenen Strukturen flexibler Vegetation anwendbar. Insbesondere die Untersuchung und allgemeingültige formelmäßige Beschreibung des Fließwiderstands von flexibler Vegetation erfordert noch umfangreiche tiefergehende Forschungsarbeiten sowohl unter Laborbedingungen als auch direkt in der Natur.

Darüber hinaus haben sich aus der Implementierung der Berechnungsansätze für überströmte Vegetation nach Huthoff (2008) bzw. van Velzen (2003) Unzulänglichkeiten hinsichtlich einer geeigneten Turbulenzmodellierung im Bereich der Vegetationsschicht gezeigt. Auch hierfür sind weitere gezielte Modelluntersuchungen unter Laborbedingungen erforderlich, die zur Validierung und Weiterentwicklung des in Kap. 3.2.3 beschriebenen Mehrschichtenansatzes geeignet sind.

Auch die Ermittlung von geometrischen Parametern aus den in der Natur beobachteten äußerst heterogenen Vegetationsstrukturen wirft Fragen auf, deren Klärung ebenfalls nur durch entsprechende Laboruntersuchungen und Naturmessungen möglich ist.

Die in der BfG begonnenen Arbeiten zur automatisierten Erfassung von Vegetationszonen zeigen ein vielversprechendes Potenzial, das durch die Hinzunahme weiterer Messparameter, wie z. B. RGB-Luftbilddaten, ausgebaut werden sollte. In diesem Zusammenhang wäre es auch zielführend, das Potenzial von flugzeuggestützten Laserscanner-Daten mit Full-Waveform-Informationen hinsichtlich der automatischen Erfassung von vertikalen Dichtefunktionen in Vegetationszonen sowie deren jahreszeitliche Veränderlichkeit zu erkunden.

5 Literatur

- BAW (2014): Hydrodynamisch-numerische Modelluntersuchung zur aktuellen Genehmigungsplanung der Nebenrinne und Auewaldpflanzung im Bereich des Emmericher Wards; Modelluntersuchungen im Rahmen des "Declaration of Support" für das LIFE+ Projekt Emmericher Ward in Kooperation mit dem NABU; BAW-Gutachten..
- Brockmann, H.; Haase, A.; Mandlbürger, G.; Schröder, P.M. (2010): LIDAR-Datenpotenziale für hydrodynamisch-numerische Modelluntersuchungen; 30. Wissenschaftlich-technische Jahrestagung der DGPF; Dreiländertagung, Wien 2010; Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V.
- BWK (1989): Hydraulische Berechnung von Fließgewässern; Teil 1 Stationäre Berechnung der Wasserspiegellinie unter besonderer Berücksichtigung von Bewuchs- und Bauwerkseinflüssen; Merkblatt Heft 1; Bund der Ingenieure für Wasserwirtschaft und Kulturbau.
- Coles, D. (1956): The law of the wake in a turbulent boundary layer; Journal of Fluid Mechanics 1, 191–226.
- DVWK (1991): Merkblätter zur Wasserwirtschaft - Hydraulische Berechnung von Fließgewässern; Heft 220/1991; Hamburg [u.a.]: Verlag Paul Parey.
- Eisenhauer, N., Sommer, C. (2003): Einfluss der Vorlandvegetation auf den Hochwasserabfluss und die Sohlstabilität in Bundeswasserstraßen; Forschungsbericht der Versuchsanstalt für Wasserbau der Fachhochschule Karlsruhe – Hochschule für Technik.
- Eisenhauer, N.; Sommer, C. (2004): Laborversuche in der Versuchsanstalt für Wasserbau der FH-Karlsruhe; Forschungsbericht der Versuchsanstalt für Wasserbau der Fachhochschule Karlsruhe – Hochschule für Technik.
- IWW, Valitec (2015): Einfluss von Vegetation auf den Vorlandabfluss - Hydrografische und hydrometrische Untersuchung von Vorländern des Rheins bei Langel (Rhein-km 672), Perrich (Rhein-km 817) und Emmerich (Rhein-km 855). Bericht des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft (RWTH Aachen) und des Ingenieurbüros valitec simulations.
- Hänssig, P.A. (2008): Einfluss von Auenwaldvegetation auf die Strömungsverhältnisse an Bundeswasserstraßen - 2D-tiefengemittelte hydrodynamisch numerische Simulation durchströmter Vorlandvegetation am Beispiel des Rheinabschnittes Wesel; Diplomarbeit.
- Huthoff, F. (2007): Modeling Hydraulic Resistance of Floodplain Vegetation; Dissertation; University of Twente - ISBN 978-90-365-2553-4.
- Huthoff, F. (2012): Theory for flow resistance caused by submerged roughness elements; Journal of Hydraulic Research, Vol.50, No. 1, pp. 10–17.

- Jalonen, J., Järvelä, J. (2014): Estimation of drag forces caused by natural woody vegetation; *Journal of Hydraulic Research*, 26(4):608-623, DOI: 10.1016/S1001-6058(14)60068-8.
- KIT (2015): Automatisierte Ableitung von Vorlandrauheiten für hydrodynamische Modellierungen auf der Basis von flugzeuggestützten Fernerkundungsdaten (Vorlandrauheiten an BWaStr); Endbericht des Instituts für Photogrammetrie und Fernerkundung (IPF) und des Instituts für Wasser und Gewässerentwicklung (IWG) des Karlsruher Institut für Technologie (KIT) im Auftrag der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG).
- Klopstra, D., Barneveld, H.J., van Noortwijk, J.M, van Velzen, E.H. (1997): Analytical model for hydraulic roughness of submerged vegetation; *IAHR Faculty of Engineering and Environmental Science, Warsaw Agricultural University* - DOI 10.1623/hysj.53.4.905.
- Kowalski, R.L.; Schröder, P.M. (2006): Pflanzen in der 2D Simulation von Flüssen; *Wasserbaukolloquium 2006: Strömungssimulation im Wasserbau, Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen Heft 32*.
- Lindner, K. (1982): Der Strömungswiderstand von Pflanzenbeständen; *Mitteilungen des Leichtweiß-Institut für Wasserbau der Technischen Universität Braunschweig, Heft 75*.
- Pasche, E. (1984): Turbulenzmechanismen in naturnahen Fließgewässern und die Möglichkeiten ihrer mathematischen Erfassung; *Dissertation; Mitteilungen des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen; Heft 52; Aachen - ISSN 0343-1045*.
- Rouvé, G. (1987): Hydraulische Probleme beim naturnahen Gewässerausbau; *Forschungsbericht DFG, Ergebnisse aus dem Schwerpunktprogramm „Anthropogene Einflüsse auf hydrologische Prozesse“, Band 2*.
- Rouvé, G., Schröder, M. (1994): Die Entwicklung eines mathematisch-numerischen Verfahrens zur Berechnung naturnaher Fließgewässer; *Abschlußbericht zum DFGProjekt Ro 365/31-6, 2. korrigierte Fassung 12/2004*.
- Schlichting, H., Gersten, K. (2006): *Grenzschicht-Theorie; 10., überarbeitete Auflage, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg*.
- Schröder, P.M. (1997): Zur numerischen Simulation turbulenter Freispiegelströmungen mit ausgeprägt dreidimensionaler Charakteristik; *Mitteilungen des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft, RWTH Aachen, Heft 108*.
- Schröder, P.M.; Forkel, C. (1999): Mathematische Beschreibung der physikalischen Prozesse; in *DVWK-Schrift 127 Numerische Modelle von Flüssen, Seen und Küstengewässern; zsgest. von W. Zielke; ISBN 3-89554-099-4*.
- Servouse, P. (2015): Modelluntersuchungen technisch-biologischer Ufersicherungen in der Versuchsstrecke Worms; *Bachelorarbeit an der Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft*.

- Van Velzen, E. H., Jesse, P., Cornelissen, P., Coops, H. (2003): Stromingsweerstand vegetatie in uiterwaarden; Deel 1 Handboek versie 1-2003 en Deel 2 Achtergronddocument versie 1-2003, RIZA rapport 2003.028/2003.029.
- Wenka, T.; Schröder, P.M. (2004): Unsicherheiten bei der Abbildung von 3D-Effekten in der Hochwasserabschätzung mit 2D-tiefengemittelten Berechnungsverfahren; Wasserbauliche Mitteilungen des Instituts für Wasserbau und Technische Hydromechanik der TU Dresden, Heft 27; ISBN 3-86005-414-7.
- Whittacker, P. (2014) Modelling the Hydrodynamic Drag Force of Flexible Riparian Woodland; PhD Thesis, Cardiff University.